

PROPUESTA DE ESQUEMA DE OPTIMIZACIÓN DE FSS MULTICAPA

A. L. Gutiérrez, M. Lanza, I. Barriuso, L. Valle, M. Domingo, J. R. Pérez and J. Basterrechea
Dpto. Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Cantabria.
Laboratorios I+D de Telecomunicaciones. Plaza de la Ciencia, Avda. Los Castros s/n. 39005 Santander
{angelluis.gutierrez, jose.basterrechea}@unican.es

Abstract- Frequency selective surfaces (FSS) are structures that filter or preserve some frequency bands. Usually, the desired spectral response is obtained tuning manually the dielectric materials and periodic geometries of the FSS.

The design process of a FSS is costly and difficult to finish if the filtering response to be synthesized cannot be directly obtained with classical geometries. To overcome this problem, in this paper a heuristic method (PSO) and an analysis methodology of structures with several periodic surfaces (CG-FFT) are combined in order to automate the search. The analysis method uses a multilayer Green's function that considers the mutual coupling effects using a transmission line model for translating the field from the source FSS to the other periodic surfaces.

A comparison with commercial simulators and results for the optimization of a FSS with two periodic layers, are presented to show the usefulness of the approach.

I. INTRODUCCIÓN

Desde su aparición a principios del siglo pasado, las superficies selectivas en frecuencia (FSS) han sido utilizadas, entre otras posibilidades, como filtros espaciales para alterar la amplitud de un campo electromagnético, como por ejemplo, para evitar la detección de un blanco cuando es apuntado con un RADAR o para crear una estructura con la que proteger agrupaciones de antenas [1]. En definitiva, el diseño de una FSS está orientado a la obtención de una estructura multicapa que presente una respuesta espectral con la que conseguir la funcionalidad que necesita una aplicación. Durante este proceso, se deberá determinar qué tipo de superficies conductoras (forma y periodo) y qué materiales dieléctricos (constante dieléctrica y espesor) son los adecuados para implementar la FSS.

En algunos casos, sobre todo si el rango frecuencial a cubrir es pequeño, para cumplir con los requisitos de diseño basta con utilizar FSS compuestas por una superficie periódica. En caso contrario, ya sea para conseguir que la misma estructura trabaje en dos o más bandas frecuenciales o para obtener unos niveles de filtrado más restrictivos, es necesario utilizar una FSS con varias capas conductoras, ya que la interacción entre todos los niveles permite obtener respuestas espectrales complejas.

Generalmente, el diseño de la FSS se realiza mediante un proceso de prueba y error, durante el cual se utiliza algún tipo de simulador de onda completa para obtener la respuesta espectral de cada una de las estructuras que se han ido probando hasta dar con la final. En función de la complejidad del comportamiento frecuencial buscado,

terminar la FSS puede llevar más o menos tiempo, sobre todo si las geometrías canónicas no son adecuadas para implementar la estructura. Una posible solución sería automatizar el proceso de búsqueda mediante la utilización de un método de optimización con el que se determine que materiales y geometrías deben ser utilizados en la implementación de la FSS, tal y como varios autores han propuesto con anterioridad, bien empleando algoritmos genéticos (GA) o bien utilizando la optimización mediante enjambres de partículas (PSO) [2], en su mayoría para optimizar una FSS formada por una sola superficie periódica.

En este trabajo se ha combinado una versión binaria de PSO junto con el método del Gradiente Conjugado en Combinación con la Transformada Rápida de Fourier (CG-FFT), capaz de analizar estructuras multicapa con varios niveles de metalización y varios medios dieléctricos. En este caso, el CG-FFT se utiliza para obtener el comportamiento espectral de cada una de las soluciones propuestas por el PSO y, de esta forma, ponderar la calidad de cada una de ellas. Este método es utilizado para determinar los materiales, periodos y geometrías de una FSS compuesta por dos capas metálicas, como la mostrada en la Fig. 1, de tal forma que la respuesta frecuencial de la estructura se ajuste a los límites impuestos por varias máscaras frecuenciales.

El resto del artículo está organizado como sigue: en la sección II se introduce brevemente el método de análisis multicapa y se comparan algunos resultados con simuladores comerciales para demostrar su comportamiento. Por otro lado, en la sección III el proceso de optimización es aplicado a la optimización de una FSS con dos capas metálicas y tres medios dieléctricos para que esta estructura tenga una respuesta espectral determinada en un rango frecuencial amplio. Por último, en la sección IV, se presentan las principales conclusiones de este trabajo.

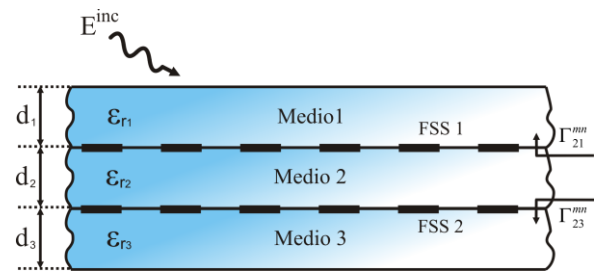


Fig. 1. Esquema de la FSS con dos capas metálicas y tres dieléctricos

II. FUNDAMENTOS DEL MÉTODO CG-FFT MULTICAPA

A diferencia de otras técnicas de análisis multicapa, como la matriz de scattering generalizada (GSM) o el espectro de ondas planas discreto (DPWS), en este trabajo se presenta un método que determina la respuesta espectral de una FSS multicapa, formada por varias superficies metálicas y medios dieléctricos, mediante el modelado de la estructura completa en el dominio real y su caracterización en el dominio espectral mediante modos de Floquet. El método CG-FFT es utilizado para obtener las corrientes inducidas en las metalizaciones y de esta forma, conocer el coeficiente de transmisión y de reflexión de la FSS multicapa en el rango frecuencial de interés.

A continuación se presentan las ecuaciones básicas de este método, desarrolladas para efectuar el análisis de una FSS compuesta por dos niveles de metalización y tres medios dieléctricos, aunque pueden ser extendidas sin problemas a estructuras con un número arbitrario de capas.

En el caso que nos ocupa, el análisis de una FSS con dos niveles de metalización se basa en la ecuación integral de campo eléctrico (EFIE), con la que se obtiene el campo dispersado, y en la consideración de las condiciones de contorno en cada discontinuidad donde exista una superficie periódica. De esta forma, las componentes tangenciales del campo eléctrico incidente deben ser iguales a la suma del campo dispersado tanto por la superficie superior (numerada como 1) y la inferior (numerada como 2); tal y como se presenta en las ecuaciones (1) y (2):

$$\hat{n} \times \vec{E}_1^i(\vec{r}) = \hat{n} \times \vec{E}_{1,1}^s(\vec{r}) + \hat{n} \times \vec{E}_{1,2}^s(\vec{r}) \quad (1)$$

$$\hat{n} \times \vec{E}_2^i(\vec{r}) = \hat{n} \times \vec{E}_{2,1}^s(\vec{r}) + \hat{n} \times \vec{E}_{2,2}^s(\vec{r}) \quad (2)$$

donde \hat{n} es el vector normal a las superficies, los términos de la izquierda equivalen al campo incidente y los términos de la derecha corresponden al campo total dispersado. Además, la notación $E_{a,b}$ representa el campo dispersado que hay en a debido a la presencia en dicha superficie de modos propagantes y evanescentes de Floquet generados por las corrientes inducidas en la superficie b . Desarrollando un poco más las ecuaciones (1) y (2), se obtiene la relación entre las componentes tangenciales x e y de campo incidente con las componentes directas y cruzadas de campo dispersado, como se muestra a continuación:

$$-E_{x|c}^i(\vec{r}) = \sum_{f=1}^2 [E_{xx|c,f}^s(\vec{r}) + E_{xy|c,f}^s(\vec{r})] \quad (3)$$

$$-E_{y|c}^i(\vec{r}) = \sum_{f=1}^2 [E_{yx|c,f}^s(\vec{r}) + E_{yy|c,f}^s(\vec{r})]. \quad (4)$$

donde c indica la capa metálica bajo estudio y, por lo tanto, puede tomar el valor 1 o 2 para la capa superior e inferior, respectivamente.

Para calcular las componentes de campo dispersado que aparecen en las ecuaciones (3) y (4), se utiliza la expresión mostrada en la ecuación (5) en la que J_b es la corriente existente en la capa metálica b , $G_{a,b}$ es la función de Green periódica con la que se contemplan las características espectrales de los tres medios dieléctricos

que forman la estructura para los modos de Floquet considerados (cuyo número depende del muestreo realizado).

$$\vec{E}_{a,b}^s(\vec{r}) = \int_{S'_a} G_{a,b}(\vec{r} - \vec{r}') \vec{J}_b(\vec{r}') dS'_a \quad (5)$$

El modelado del problema se realiza mediante la aproximación de las densidades de corriente por funciones subdominio del tipo roof-top dirigidas según las direcciones principales y distribuidas sobre un mallaado rectangular uniforme en ambas direcciones. Adicionalmente se emplean funciones de promediado del tipo blade-razor. En las posiciones de esta malla, podrá o no existir geometría en función de si una de las dimensiones de la solución encontrada por el PSO toma el valor '1' o el '0', respectivamente.

La resolución se aborda mediante el método CG-FFT realizando la discretización en el dominio transformado. Esto permite su empleo en el proceso de optimización al reducirse significativamente el tiempo de resolución frente a otras opciones. El muestreo en el dominio espectral se realiza mediante el vector (6) para el modo mn de Floquet. De esta manera, se obtienen las ecuaciones discretas para el campo dispersado (7) e incidente (8):

$$\vec{k}^{mn} = \frac{2\pi}{P_x} m \hat{x} + \frac{2\pi}{P_y} n \hat{y} \quad (6)$$

$$E_{\alpha\beta|a,b}^{sD}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi^2} F^{-1} \left\{ \prod (\vec{k}^{mn} - \vec{k}_i) \cdot [\tilde{B}_{\alpha\beta} \tilde{G}_{\alpha\beta|a,b} \tilde{J}_{\beta b}^D] \right\} \quad (7)$$

$$E_{\alpha|a}^{iD}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi^2} F^{-1} \left\{ \prod (\vec{k}^{mn} - \vec{k}_i) \cdot [\tilde{E}_{\alpha|a}^i \tilde{B}_{\alpha|a}] \right\} \quad (8)$$

donde P_x y P_y son los periodos de la estructura, α y β representan indistintamente la dirección x o y , F^{-1} es la transformada inversa de Fourier y \sim la transformada directa. Además, $B_{\alpha|b}$ es la función de test blade-razor orientada según α y $J_{\beta b}$ es la función base roof-top orientada según β ; ambas evaluadas en la capa metálica b . Por último, $G_{\alpha\beta|a,b}$ es la componente $\alpha\beta$ de la función de Green multicapa con la que se calcula el campo en la superficie a a partir de las fuentes de corriente situadas en la capa b . Esta función de Green puede obtenerse aplicando un modelo de línea de transmisión, y las correspondientes impedancias de cada uno de los armónicos de cada medio.

En el caso de que la FSS a analizar sólo tenga una capa conductora, la función de Green (9) es la misma que han utilizado con anterioridad otros autores [3], en la que los términos Z son la impedancia total vista desde una capa metálica por las componentes TE y TM del modo de Floquet mn . En nuestro caso (9) modela el campo dispersado, definido en (7) cuando a y b son iguales, que genera cada una de las superficies periódicas de la estructura independientemente del resto.

$$\begin{bmatrix} \tilde{G}_{xx}^{mn} & \tilde{G}_{xy}^{mn} \\ \tilde{G}_{yx}^{mn} & \tilde{G}_{yy}^{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{TE}^{mn} (k_x^{mn})^2 + Z_{TM}^{mn} (k_y^{mn})^2}{(k_x^{mn})^2 + (k_y^{mn})^2} & \frac{(Z_{TE}^{mn} - Z_{TM}^{mn}) k_x^{mn} k_y^{mn}}{(k_x^{mn})^2 + (k_y^{mn})^2} \\ \frac{(Z_{TE}^{mn} - Z_{TM}^{mn}) k_x^{mn} k_y^{mn}}{(k_x^{mn})^2 + (k_y^{mn})^2} & \frac{Z_{TM}^{mn} (k_x^{mn})^2 + Z_{TE}^{mn} (k_y^{mn})^2}{(k_x^{mn})^2 + (k_y^{mn})^2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Esta función de Green permite calcular el campo en la posición de las fuentes de corriente que lo crean. Sin embargo, aplicando un factor de desplazamiento a las componentes TE y TM, puede ser utilizada para modelar las interacciones entre una superficie conductora y el resto. Para la FSS de este estudio (Fig. 1), en función de la dirección a considerar, existen dos coeficientes de desplazamiento. El primero de ellos (10) relaciona el campo total en la interfaz que contiene a la FSS 1, con el campo total en la posición de la FSS 2, cuando sólo se analiza el campo dispersado por las fuentes de corriente de la FSS 2. De manera similar, el factor de transmisión contrario (11) define la relación de campos entre la FSS 2 y la FSS 1 cuando esta última posee fuentes de corriente. Además, tanto (10) como (11) han sido calculados para el armónico mn de Floquet, considerando el coeficiente de reflexión visto desde la interfaz derecha, Γ_{23} , e izquierda, Γ_{12} , del medio dieléctrico 2, respectivamente.

$$T_{1,2}^{TM/TE} = \frac{1 + \Gamma_{23}^{mn, TM/TE}}{1 + \Gamma_{23}^{mn, TM/TE} \cdot e^{(-2j \cdot k_{z2}^{mn} \cdot d_2)}} \cdot e^{(-j \cdot k_{z2}^{mn} \cdot d_2)} \quad (10)$$

$$T_{2,1}^{TM/TE} = \frac{1 + \Gamma_{21}^{mn, TM/TE}}{1 + \Gamma_{21}^{mn, TM/TE} \cdot e^{(-2j \cdot k_{z2}^{mn} \cdot d_2)}} \cdot e^{(-j \cdot k_{z2}^{mn} \cdot d_2)} \quad (11)$$

Para verificar el comportamiento del método desarrollado, el CG-FFT se ha utilizado para obtener la respuesta espectral de una FSS compuesta por dos cruces periódicas, con el periodo y dimensiones mostrados en la Fig. 2, entre las que se ha interpuesto un material con una constante dieléctrica de 2.58 y un espesor de 1 mm. Esta estructura se ha analizado en un rango frecuencial que va de 12 GHz a 20 GHz, utilizando como excitación una onda plana con polarización TM y una incidencia normal.

En la Fig. 3, se comparan los coeficientes de transmisión y de reflexión obtenidos con el método CG-FFT con los resultados de dos simuladores electromagnéticos: CST y HFSS. Las únicas diferencias apreciables entre las respuestas espectrales de la FSS, obtenidas con el CG-FFT, CST y HFSS, aparecen en una zona de resonancia, ya que en la banda de 14 GHz a 15 GHz los tres simuladores electromagnéticos presentan resultados diferentes. Sin embargo, en general CG-FFT, CST y HFSS han obtenido resultados similares con pequeñas variaciones en frecuencia y en pendiente.

Sin embargo, aunque el comportamiento espectral obtenido con los tres métodos es muy parecido, el CG-FFT tarda menos tiempo que el resto en terminar el análisis de la estructura y, por lo tanto, es más adecuado para llevar a cabo la optimización de una FSS multicapa. Optimización de una FSS de tres capas.

En publicaciones previas [4], el PSO binario ha sido utilizado para llevar a cabo la optimización de FSS compuestas por una capa metálica y dos medios dieléctricos. El proceso de optimización de una FSS multicapa como la presentada en la Fig. 1 es similar, pero aunque el número de variables que el PSO debe considerar es superior [5].

En el caso que nos ocupa, la optimización comienza con el mapeo en una secuencia binaria (que más tarde será inicializada aleatoriamente), de los parámetros físicos que

componen la FSS: constantes dieléctricas y espesores de los tres medios dieléctricos, así como la geometría y el periodo de las dos superficies periódicas.

Durante la búsqueda de la solución, las secuencias binarias propuestas por el PSO son transformadas en una serie de parámetros físicos con los que se forma una FSS real. Concretamente, a partir de un segmento de información binaria, se genera la geometría replicando con simetría especular la geometría codificada para formar la FSS, los materiales son obtenidos indexando una base de datos de más de 500 entradas y los periodos de la estructura expresando un número binario en real.

Una vez construida la FSS, esta es analizada con el método CG-FFT para obtener el coeficiente de transmisión y de reflexión de la estructura y, de esta forma, determinar la calidad de la solución propuesta mediante una función de coste (fitness) que compara la respuesta espectral obtenida con una serie de máscaras frecuenciales. De acuerdo a esta información, el PSO actualiza las secuencias binarias que forman el enjambre que de nuevo volverán a ser decodificadas y ponderadas, hasta que se encuentre una solución con un error razonable.

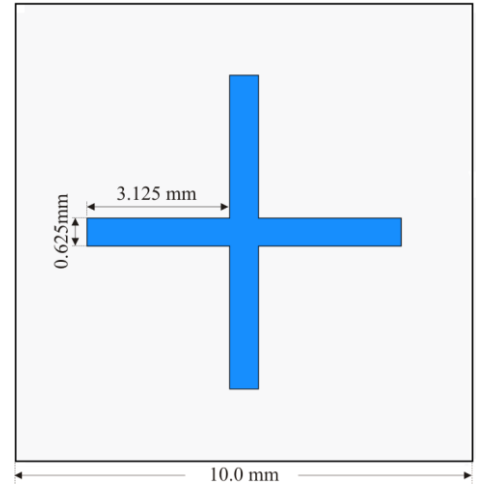


Fig. 2. Forma de la celda base utilizada para validar el método de análisis multicapa presentado en este trabajo.

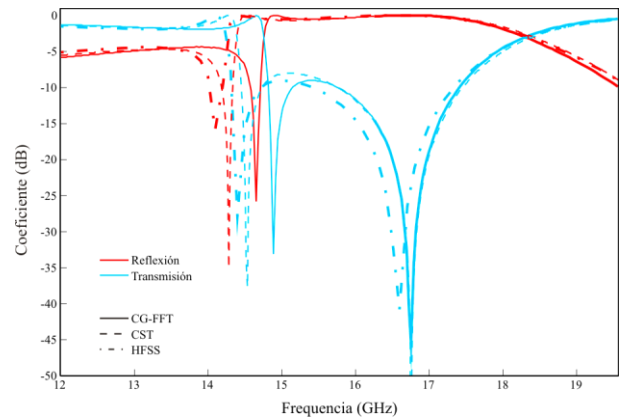


Fig. 3. Respuesta espectral en transmisión y en reflexión de la FSS utilizada para validar el método de análisis multicapa.

Este proceso de optimización ha sido configurado para que la respuesta espectral de la FSS se ajuste a los requisitos frecuenciales especificados mediante las bandas a , A , b y B mostradas en la Fig. 4. Por una parte las bandas a y A , centradas en 7.5 GHz y 10 GHz, imponen límite superior al coeficiente de transmisión (-23 dB y -15 dB). Por otra parte, b y B son bandas centradas en 8.5 GHz y 11 GHz, con las que se fija un límite inferior de -3 dB y -4 dB para el coeficiente de transmisión y un límite superior de -15dB al coeficiente de reflexión (a la frecuencia central de cada banda). Además, debido a la naturaleza binaria del problema, los materiales dieléctricos, periodos y geometrías son codificados en 9, 7 y 49 bits, respectivamente, lo que hace necesario un vector de 139 bits para llevar a cabo la optimización. En cuanto a la configuración del PSO, se ha utilizado una población de 70 partículas (la mitad del número de dimensiones), actualizaciones asíncronas de la información, una vecindad global, unas constantes de aceleración iguales a 2 y un peso inercial igual a 1 [6].

Tras 12231 evaluaciones de la función de coste, el PSO ha encontrado una FSS que cumple con los requisitos frecuenciales establecidos. La respuesta de esta estructura se muestra en la Fig. 4 y las geometrías de las metalizaciones de la FSS 1 y 2 en la Fig. 5(a) y Fig. 5(b), respectivamente. Además, los principales parámetros físicos de la estructura se detallan en la Tabla I.

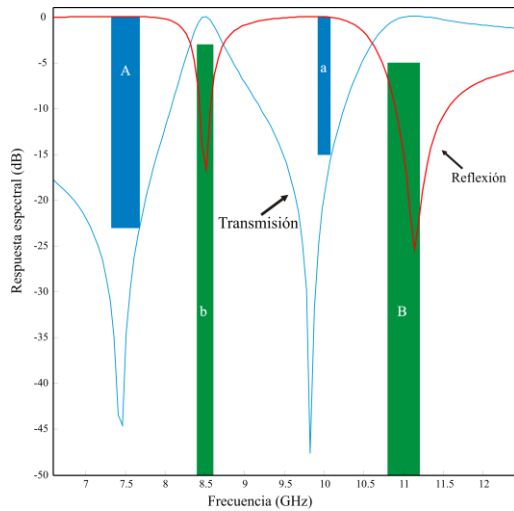


Fig. 4. Respuesta espectral optimizada y máscaras empleadas para la optimización de la FSS multicapa presentada en la FIG. 1.

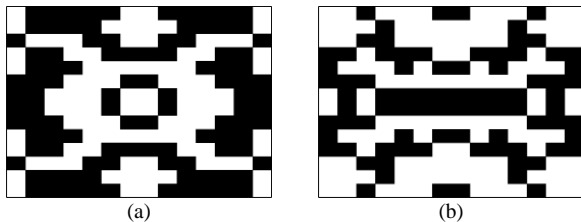


Fig. 5. Geometrías optimizadas para la FSS 1 (a) y la FSS 2 (b).

Periodo (mm)		Constantes dieléctricas			Espesor (mm)		
x	y	ϵ_{r1}	ϵ_{r2}	ϵ_{r3}	d_1	d_2	d_3
10.37	7.26	9.80	2.66	3.00	1.575	0.780	0.76

Tabla I. Parámetros físicos de la estructura optimizada.

III. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un método de optimización de FSS multicapa con el que se ajusta la respuesta espectral de una FSS en términos de máscaras frecuenciales.

Básicamente, este procedimiento combina un método heurístico de búsqueda, el PSO, con un método de análisis electromagnético, el CG-FFT, con el que se lleva a cabo la optimización de los materiales, periodos y geometrías de una FSS multicapa, de tal forma que la respuesta espectral de la estructura cumpla con los requisitos de calidad impuestos por varias máscaras frecuenciales.

Aunque esta técnica ha sido aplicada a una estructura con dos capas metálicas, puede ser extendida sin problemas a estructuras más complejas, ya que este método calcula la función de Green multicapa utilizando un modelo de línea de transmisión, con el que se determinan los desplazamientos de los diferentes modos de Floquet entre una interfaz y otra.

La herramienta de análisis ha sido validada en la sección II mediante el estudio de una FSS compuesta por dos superficies conductoras con forma de cruz, comparando los resultados del CG-FFT con el HFSS y el CST.

Por último, el método de optimización ha sido empleado para determinar los materiales, periodos y geometrías de una FSS multicapa con dos superficies conductoras de tal forma que su respuesta espectral de funcionalidad en cuatro bandas frecuenciales diferentes.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (TEC2008-02730/TEC).

REFERENCIAS

- [1] B. A. Munk, "Frequency selective surfaces. Theory and design," John Wiley and sons, 2000.
- [2] S. Genovesi, R. Mittra, A. Monorchio, and G. Manara, "Particle swarm optimization for the design of frequency selective surfaces," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 5, issue 1, pp 227-279, 2006.
- [3] M. F. Cátedra, R. P. Torres, J. Basterrechea, E. Gago, "The CG-FFT method. Application of signal processing techniques to electromagnetics," Artech House Inc., 1995.
- [4] A. L. Gutierrez, J. R. Perez, and J.R. Basterrechea, "Binary particle swarm optimization of FSS using a CG-FFT modelling," European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2009), pp 45-49, 2009.
- [5] A. L. Gutierrez, J. R. Perez, and J. Basterrechea, "Optimization of multilayer frequency selective surfaces using the binary particle swarm algorithm," European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2010), pp 1-5, 2010.
- [6] J. Kennedy, and R. Eberhart, "A binary discrete version of the particle swarm algorithm," IEEE International Conference on Computational Cybernetics and Simulation, vol. 5, pp. 4104-4108, Oct. 1997.